

INSTRUMENTACIÓN Y AUSCULTACIÓN DE UN PUENTE INTEGRAL

Dr. Ing. Hugo Corres Peiretti, Madrid, España.

Catedrático de Hormigón Estructural de la ETSI de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid. Presidente de FHECOR Ingenieros Consultores, Madrid, España.

Mg. Ing. Javier Ignacio Ezeberry, Madrid, España.

Ing. Civil la Facultad de Ingeniería de la UNCPBA, Olavarría. Magíster en Ingeniería Estructural, UNT, Tucumán. Integrante del Grupo Hormigón Estructural (HE), Madrid, España.

Ing. Tobias Philipp Petschke, Madrid, España.

Ingeniero Civil de la Universidad de Múnich, Alemania. Integrante del Grupo Hormigón Estructural (HE), Madrid, España.

Dr. Ing. Alejandro Pérez Caldentey, Madrid, España.

Profesor Titular de Hormigón Estructural de la ETSI de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid. Director del departamento de I+D de FHECOR Ingenieros Consultores, Madrid, España.

Resumen

El conocimiento del comportamiento estructural real de las obras civiles es de suma importancia, sobre todo para determinar la validez de los modelos utilizados en el proyecto de nuevas estructuras. Por este motivo, el Grupo Hormigón Estructural, sobre la base de la experiencia de campañas anteriores en estructuras de edificación (NAT Barajas y un parking subterráneo en Vigo) ha diseñado la siguiente campaña experimental en un puente integral que forma parte de la nueva carretera Ávila-Salamanca. Este trabajo se centra en la descripción de la campaña experimental, sus objetivos y los primeros resultados experimentales obtenidos.

El trabajo experimental tiene tres objetivos principales: medir las acciones ambientales de humedad y temperatura, medir las propiedades materiales y el comportamiento reológico de los hormigones utilizados en pilas y tablero y finalmente, medir la respuesta de la estructura en términos de deformaciones y movimientos. La auscultación seguirá en los próximos años y los resultados obtenidos servirán, entre otras cosas, para la comprobación de los criterios de diseño utilizados en esta clase de puentes.

Abstract

The knowledge of the real structural behavior is very important to prove the validity of the models used in the design of new structures. The Structural Concrete Research's group of the Technical University of Madrid has an important experience in the instrumentation of buildings (NAT Barajas and an underground parking in Vigo, Spain) and is now involved in field instrumental campaign of an integral bridge which is part of the "Ávila-Salamanca" highway in the center of Spain. This paper resumes the objectives and tasks accomplished during the development and execution of the instrumentation period and the first measurements results obtained.

The experimental work has three meaning goals: first, take measures of the environmental actions (humidity and temperature); second, characterize the material's properties and the rheological behavior of the concrete used in each structural's member and third, take measures of the response of the bridge in terms of strains and movements. These results will be useful for the development of new design rules for this class of bridges.

Introducción

Las estructura integrales, en general, y los puentes, en particular, son estructuras sin juntas, generalmente, totalmente monolíticas. En estas estructuras el comportamiento frente a deformaciones impuestas, fluencia, retracción y temperatura, concomitantes con las acciones gravitatorias es determinante. La experimentación de laboratorio es inexistente, en este campo, debido a la dificultad de introducir las deformaciones impuestas.

El Grupo Hormigón Estructural de la ETS de Caminos de Madrid ha realizado campañas experimentales para la medición de los efectos de deformaciones impuestas en estructuras reales de edificación, (NAT Barajas y aparcamiento subterráneo en Vigo ^{1, 2, 3} y ahora realiza la monitorización del comportamiento de un paso superior sobre la autovía Ávila-Salamanca, en el marco de un proyecto PROFIT liderado por la empresa constructora FCC y la consultora estructural FHECOR Ingenieros Consultores ⁴. En este trabajo se describe la campaña experimental, sus objetivos, la instrumentación utilizada y los primeros resultados experimentales obtenidos.

El puente instrumentado (Figura 1 y Figura 2) es un puente integral de 64,00 m de longitud, de cuatro vanos 12,00+20,00+20,00+12,00 m, respectivamente. El tablero es una losa maciza pretensada, que se encuentra rígidamente unida a pilas y estribos. De este modo, el puente es completamente monolítico. Los estribos se encuentran cimentados sobre pilotes metálicos, que le dan la flexibilidad necesaria para minimizar la coacción de los movimientos horizontales, mientras que las pilas se cimentan sobre zapatas.



(a)

(b)

(c)

Figura 1: Fotos del puente instrumentado. a) Vista inferior desde el estribo 1. Tablero rígidamente unido al estribo (b). Pila empotrada en el tablero (c).

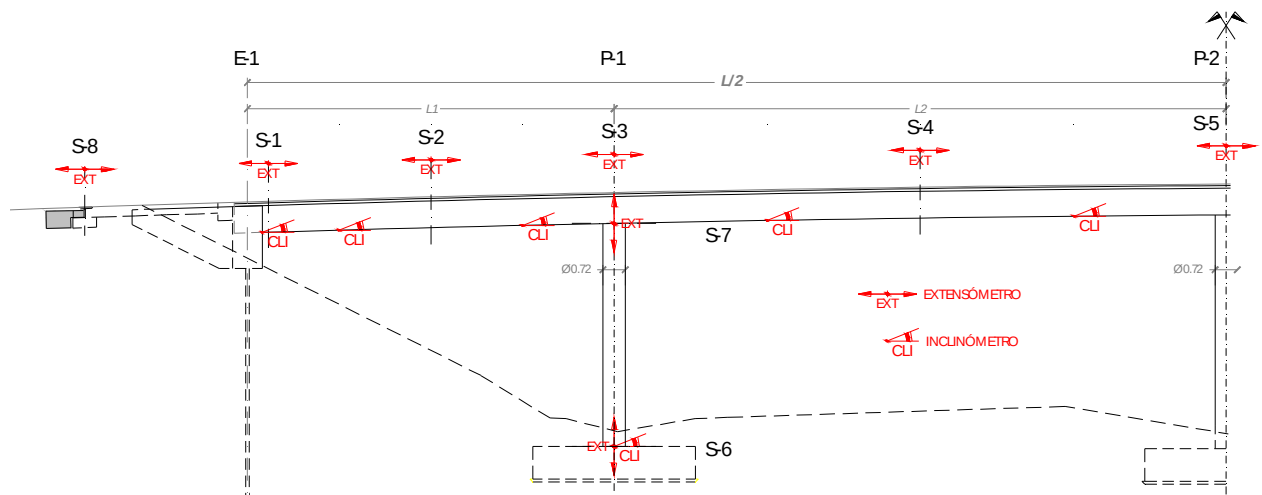


Figura 2: Esquema de instrumentación. Vista Lateral de la mitad instrumentada del puente.

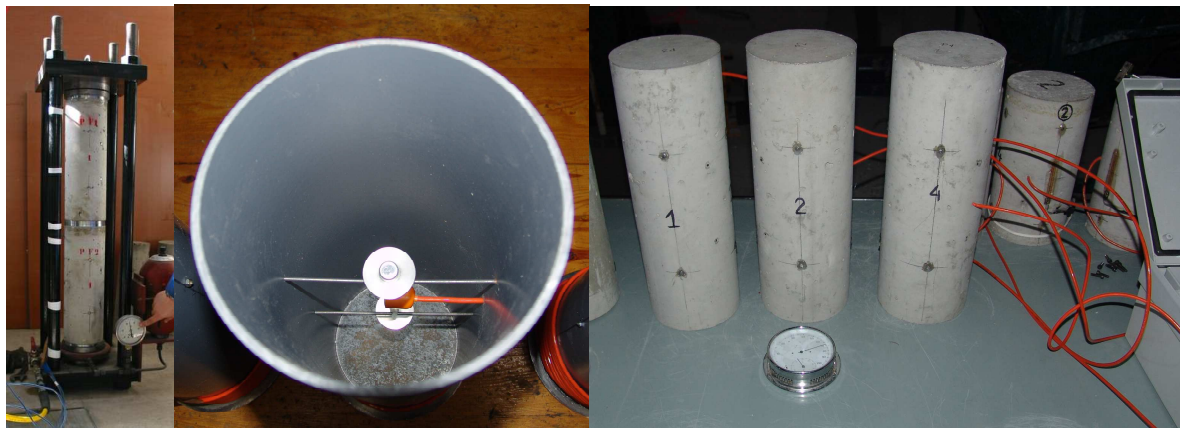
La campaña experimental tiene tres objetivos fundamentales,

1. Medir las acciones que influyen en el comportamiento en servicio. Acciones ambientales, temperatura y humedad, y las acciones reológicas intrínsecas del hormigón, fluencia y retracción.
2. Caracterizar el hormigón utilizado en el puente. Propiedades mecánicas de los materiales: resistencia a tracción, compresión y módulo de elasticidad.
3. Medir el comportamiento del puente. Deformaciones en distintos elementos estructurales, pilas y tablero, deslizamientos del puente, en estribos, y temperatura dentro del hormigón, de forma periódica a lo largo del tiempo.

Instrumental utilizado

Las acciones ambientales se miden en obra con una estación meteorológica que permite obtener la temperatura ambiente y humedad. Las acciones reológicas, fluencia y retracción, se miden en laboratorio utilizando probetas extraídas de los diferentes elementos estructurales, pilar y tablero, con cuerda vibrante. La precisión de la cuerda vibrante es de $0.5 \mu\epsilon$ y tienen un rango total de $3000 \mu\epsilon$. Este rango es suficiente para cubrir las deformaciones que ocurren en servicio. Además, cada galga viene acompañada de un termistor que permite medir la temperatura en el punto donde se coloca el sensor. Esto es útil para las posteriores correcciones.

En la Figura 3 se muestra, de izquierda a derecha, un batidor de fluencia con dos probetas, un molde de PVC preparado con la cuerda vibrante previo a su hormigonado y probetas de retracción del pilar, instrumentadas con cuerda vibrante y chinchetas para medidas con extensómetro mecánico, lo que permite contrastar los resultados obtenidos.



(a) (b) (c)
 Figura 3: Medición de propiedades reológicas. a) Bastidor de fluencia. b) Molde de probeta con cuerda vibrante en su interior. c) Probetas de retracción instrumentadas con cuerda vibrante en su interior y chinchetas en la cara exterior.

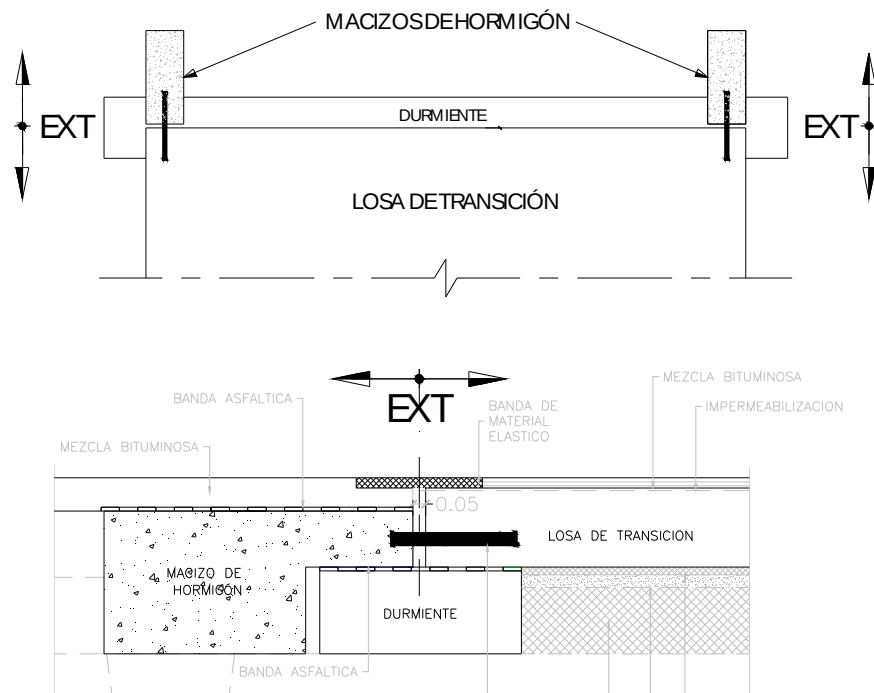


Figura 4a: Medición de los movimientos del puente. Disposición de medidores de abertura de junta, al final de las losas de transición.

Los movimientos del puente se miden con un medidor de abertura de junta de cuerda vibrante (jointmeter) que permite medir movimientos de hasta 50 mm con una precisión de 0,0125 mm (Figura 4a) e inclinómetros electrolíticos de elevada precisión, una resolución de 1", con un rango total de 40', (Figura 4b). Las deformaciones seccionales del tablero se miden con cuerdas vibrantes y las de las pilas con barras instrumentadas de cuerda vibrante, una adaptación del sensor para trabajar en zonas traccionadas, donde posiblemente ocurra fisuración (Figura 4b).

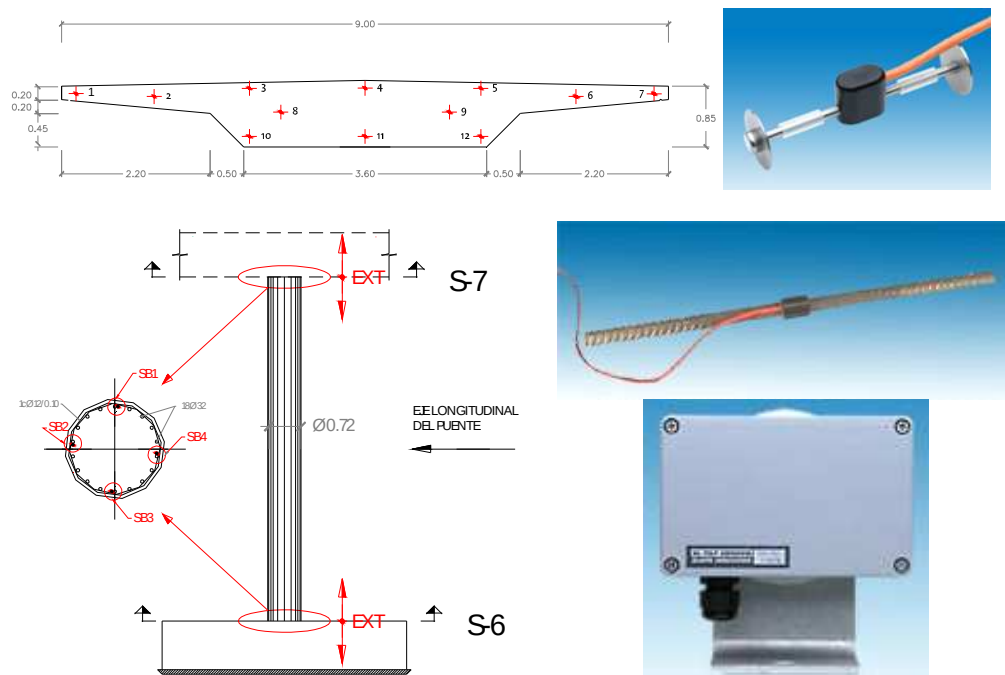


Figura 4b: Medición de deformaciones y temperaturas en las secciones del tablero y pilas. Disposición de cuerdas vibrante en tablero y pilas. Los sensores utilizados son, respectivamente, cuerda vibrante embebida, barra instrumentada con cuerda vibrante e inclinómetro ⁵.

Se ha instalado un total de 4 medidores de abertura de juntas, dos en cada extremo del puente, al final de las losas de transición; 60 galgas de cuerda vibrante en el tablero, 12 por sección instrumentada (Figura 4b), 8 barras instrumentadas en la pila, 4 en la base y 4 en cabeza, y 5 inclinómetros electrolíticos, en la parte inferior del tablero, en cuartos de luz. Una estación meteorológica a pie de obra complementa el instrumental utilizado.

Todos los datos son recogidos y almacenados cada hora, en un Data logger modelo CR1000 de Campbell, ⁶ al cual se puede acceder telefónicamente, programar y descargar los datos si es necesario. Esta información se analiza directamente desde el Laboratorio de Estructuras de la ETS de Ingenieros de Caminos de Madrid.

Resultados obtenidos

La construcción del puente comenzó con los estribos pilotados, en julio de 2007. El hormigonado de las cimentaciones fue el día 26 de octubre y las pilas el día 6 de noviembre de 2007. Debido a que el puente instrumentado no se encuentra dentro del camino crítico de la obra, el hormigonado del tablero no se realizó hasta el día 4 de marzo de 2008. Esto ha generado una diferencia de edad, entre los hormigones de la pila y tablero, de 119 días. El tesado del tablero, se realizó el día 10 de marzo, luego de comprobar que el hormigón utilizado en el tablero alcanzó la resistencia adecuada.

A continuación, se resumen algunos de los resultados obtenidos hasta el día 16 de mayo de 2008. El registro de datos ha comenzado a los tres días del hormigonado del tablero, el día 7 de marzo de 2008. El lapso de tiempo auscultado en obra es de

70 días. Durante este período se realizó el tesado del tablero y se ha quitado la cimbra. El estado de avance de la obra al momento de realizar los gráficos siguientes no ha permitido medir la abertura de las juntas, al final de las losas de transición, por no estar construidas aún.

Las probetas de retracción de las pilas se han medido desde el final del período de curado, desde el día 8 de noviembre de 2007, es decir un período de 190 días.

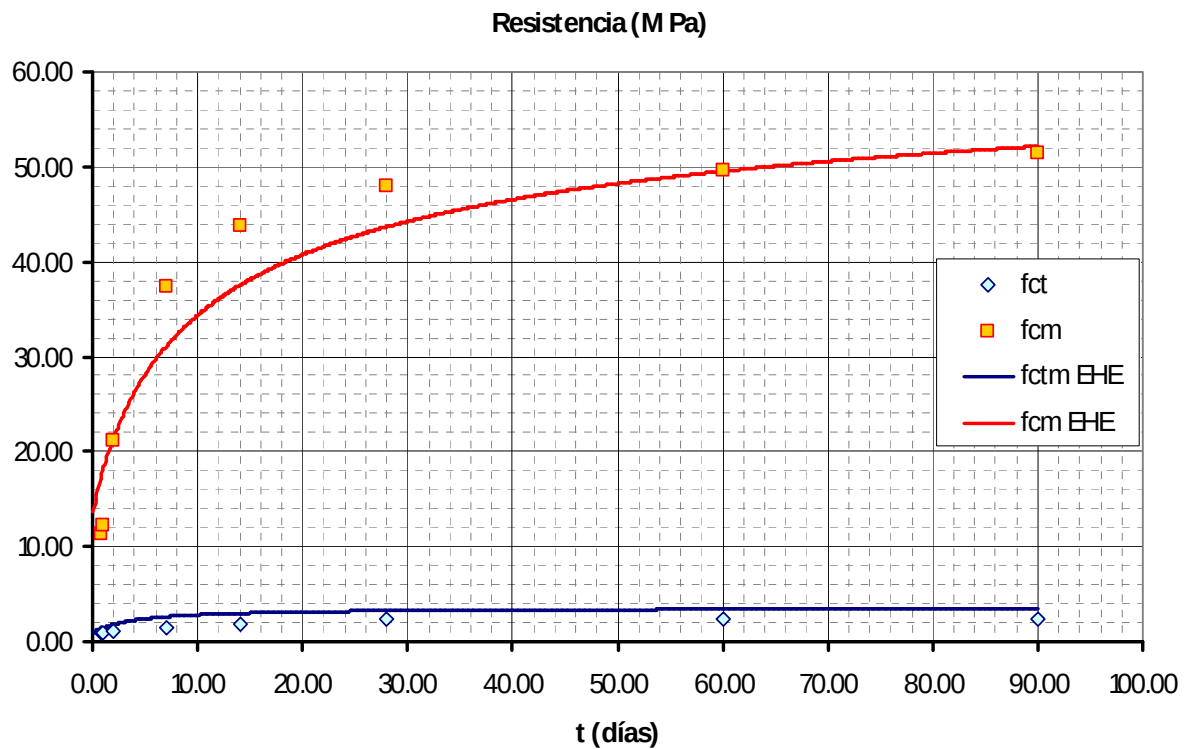


Figura 5: Resultados experimentales de resistencias de compresión y tracción de las probetas de las pilas.

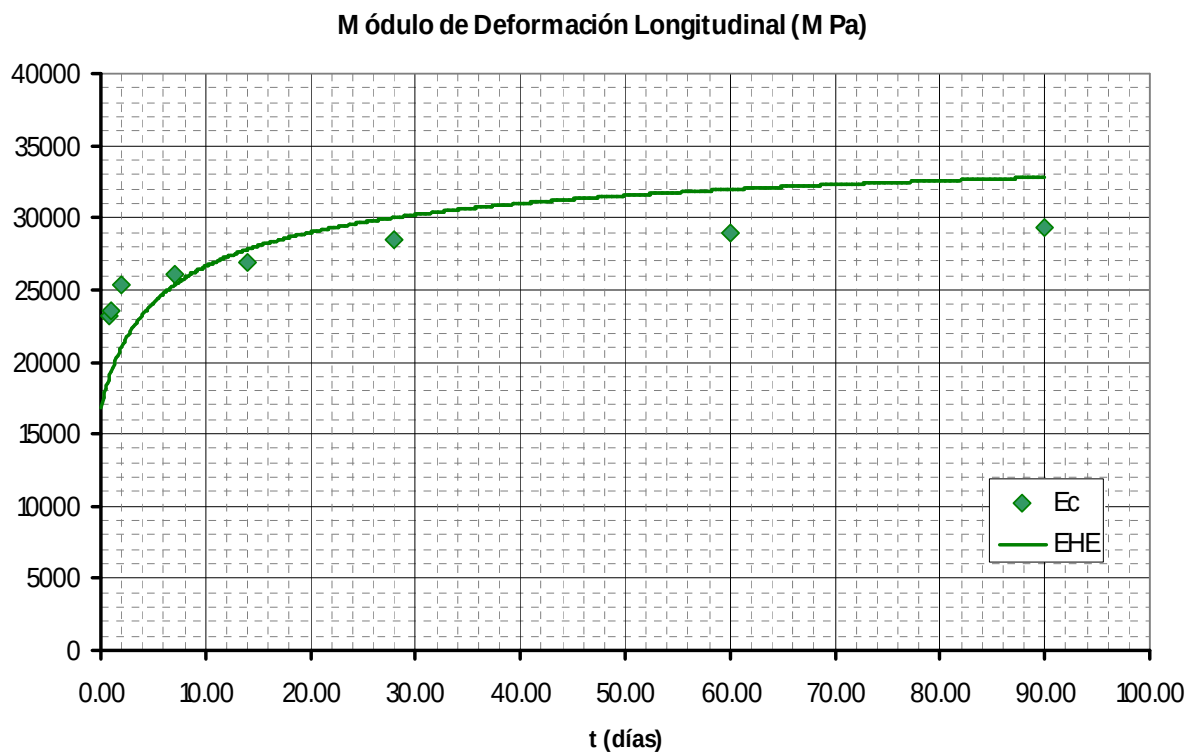


Figura 6: Resultados experimentales del módulo de deformación longitudinal de las probetas de las pilas.

Las propiedades mecánicas del hormigón utilizado se han ensayado en el laboratorio de la obra. Se han realizado ensayos de compresión, tracción y módulo de deformación longitudinal para diferentes edades, 12 horas, 24 horas, 48 horas, 7 días, 14 días, 28 días, 60 días y 90 días, de acuerdo con las siguientes normas:

- Ensayo de Compresión: Norma UNE-EN 12390-3.
- Ensayo resistencia a tracción indirecta (Ensayo Brasileño): Norma UNE-EN 12390-5.
- Ensayo de módulo elástico: UNE-EN 83316.

En las Figuras 5 y 6 se muestran los resultados experimentales obtenidos y la previsión teórica definida en la EHE⁷.

Los ensayos de retracción se realizan en probetas de 15.00 cm de diámetro y 45.00 cm de longitud, fabricadas utilizando moldes de PVC, ver Figura 3b. Dentro de cada probeta se deja una galga de cuerda vibrante embebida, centrada y alineada con el eje longitudinal de la probeta. Esto permite medir la deformación longitudinal de la probeta y la temperatura interior. Una vez endurecida, sobre la superficie exterior, se colocan bases extensométricas que permiten realizar medidas manuales de contraste. Se colocan cuatro bases, diametralmente opuestas y se promedia la deformación medida en ellas.

Los ensayos de fluencia se han realizado de acuerdo con la Norma ASTM C-512-02, en todo lo relativo a los equipos de carga e instrumentación. Se utilizan probetas similares a las utilizadas en los ensayos de retracción. Se han ensayado en un bastidor dos probetas, tal como se muestra en la Figura 3a, una de la pila y otra del

tablero. La edad de puesta en carga de la probeta del tablero es de 7 días desde su hormigonado y la edad de puesta en carga para la probeta de las pilas es de 60 días desde su hormigonado. Estas probetas se ensayan en el Laboratorio de la ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid. La frecuencia en la toma de datos de deformaciones, temperatura y humedad es de una hora. El control con extensómetro mecánico se realiza con una frecuencia mayor en las primeras etapas de carga, pasando a una frecuencia de una semana, posteriormente. Esta medida manual es de contraste y permite detectar posibles fallos en la instrumentación automatizada.

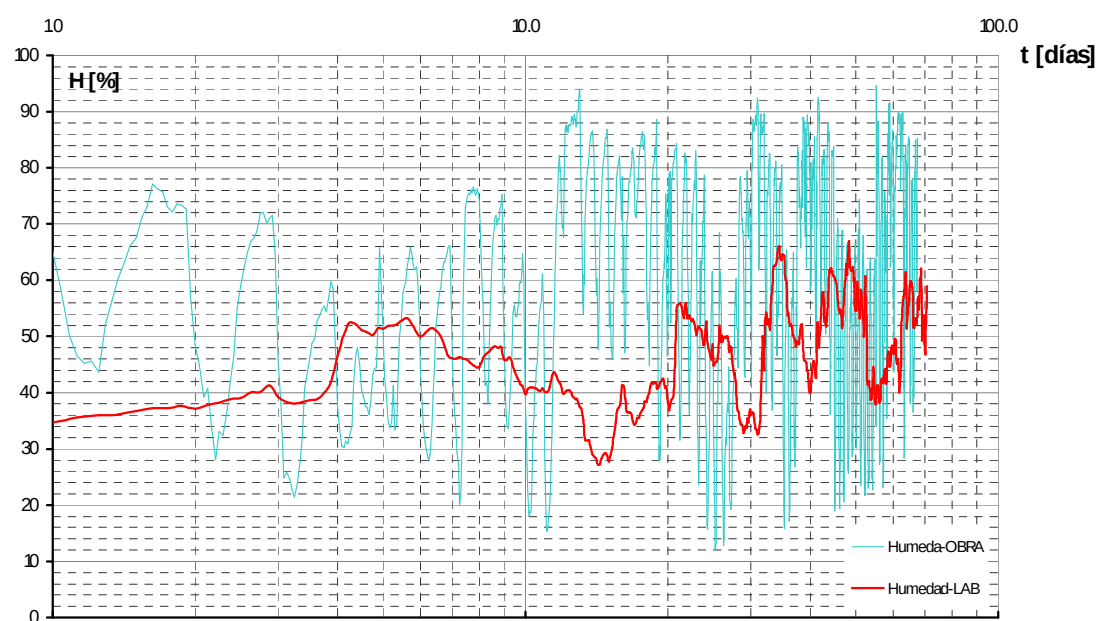
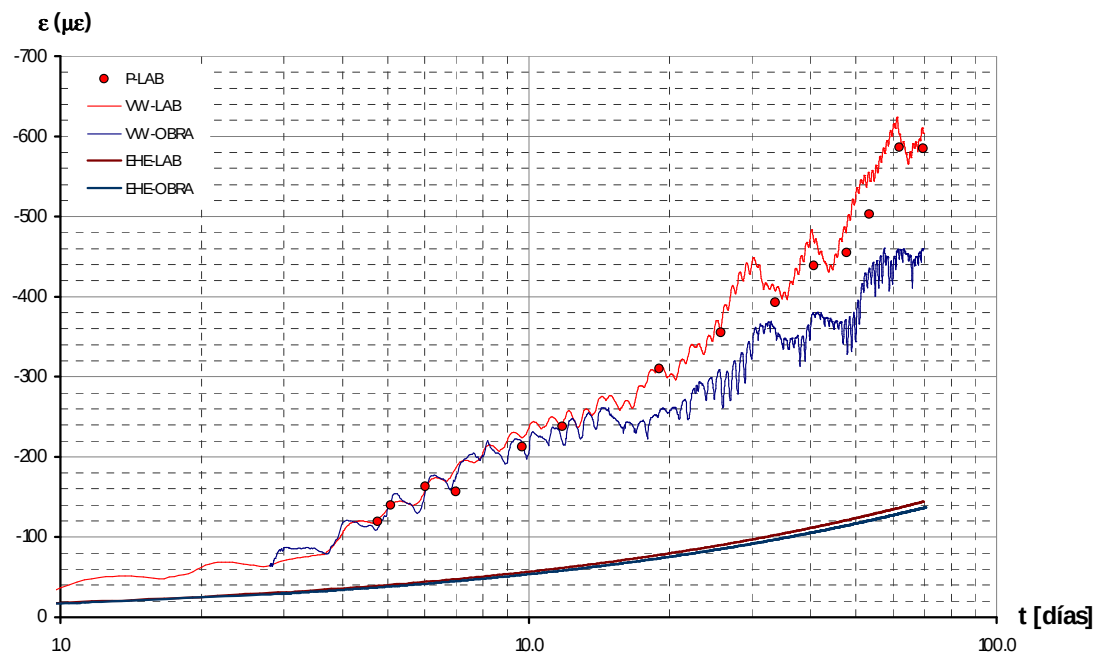


Figura 7: a) Deformaciones experimentales de retracción del hormigón del tablero y predicciones teóricas según la EHE. b) Humedad en obra y en laboratorio del mismo período. Escala logarítmica de tiempo.

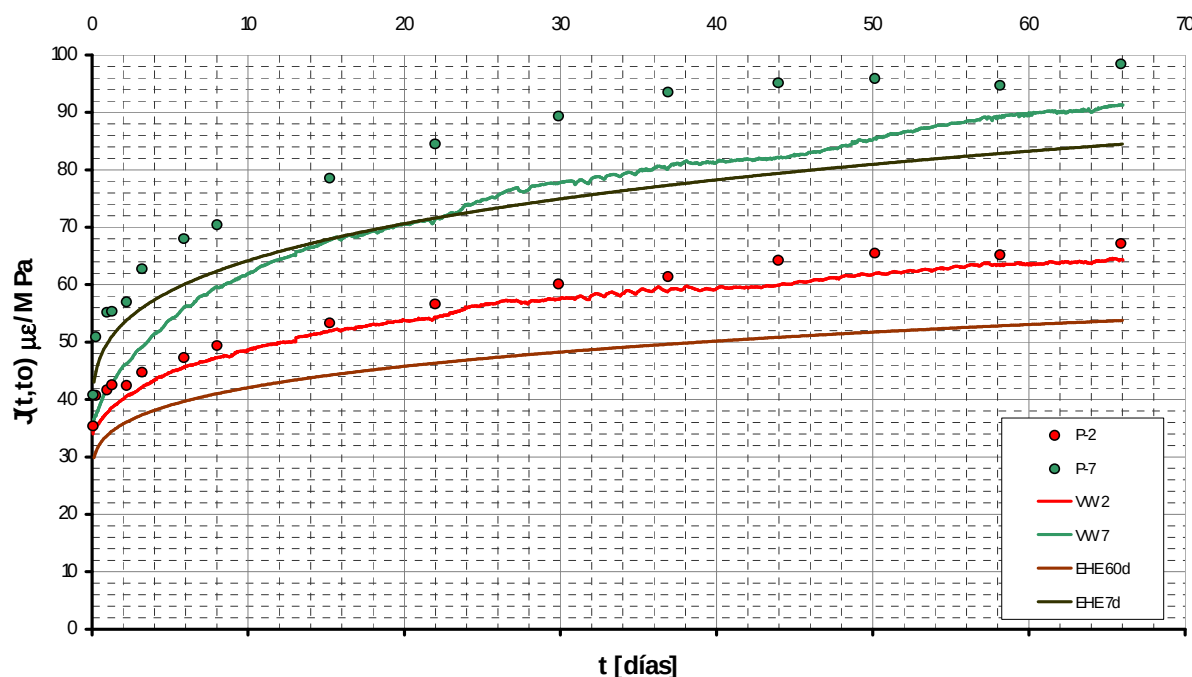


Figura 8: Función de fluencia experimental para las probetas del hormigón de la pila y del tablero y estimaciones teóricas de acuerdo con la EHE.

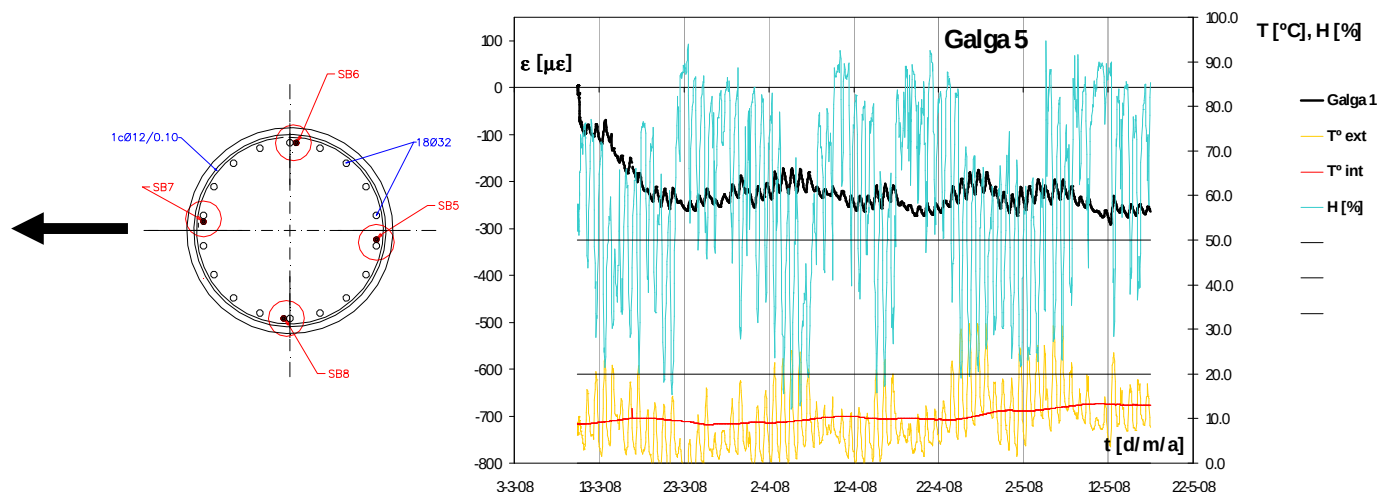


Figura 9: Deformaciones experimentales de la sección de la Pila, en la galga nº 5. Registro de deformaciones, temperatura y humedad en obra.

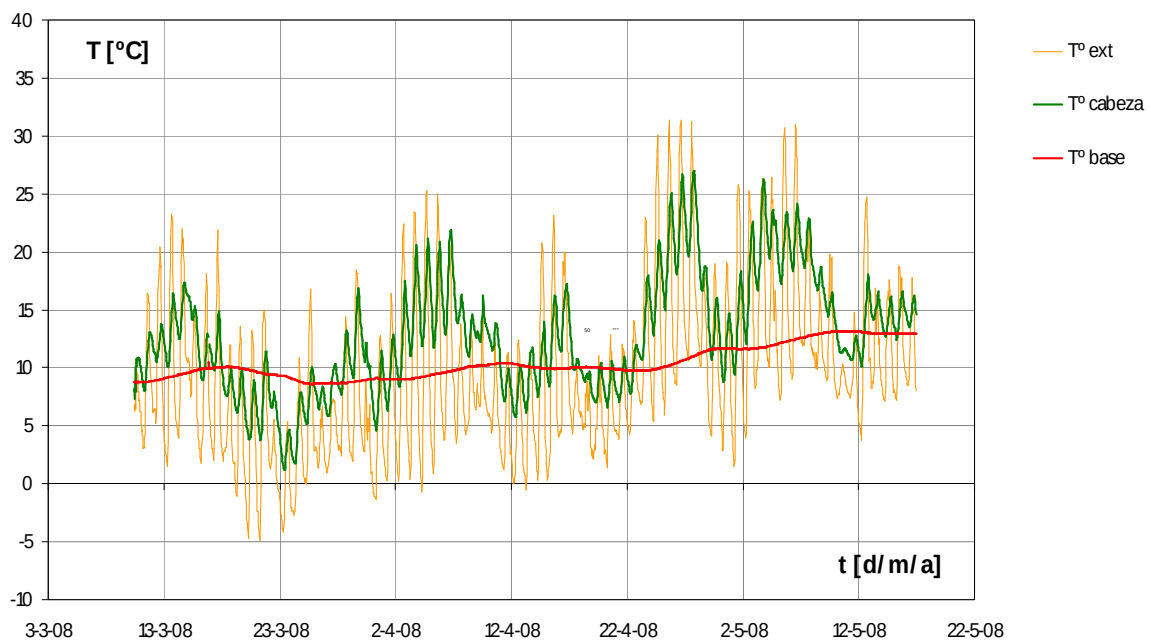


Figura10: Valores experimentales de temperatura en la sección de la base y cabeza de la pila y de la temperatura ambiente.

Los gráficos experimentales, ver desde la Figura 7 a la Figura 12, están compensados por temperatura. Los resultados experimentales obtenidos en las probetas, ver la Figura 7 y la Figura 8, muestran una buena concordancia entre la cuerda vibrante y el extensómetro mecánico.

La Figura 7a muestra la retracción medida en las probetas extraídas del tablero. Se miden un total de cuatro probetas, dos instaladas en el Laboratorio y dos en la obra. Durante el período del ensayo el laboratorio ha tenido una humedad relativa inferior a la de la obra, lo cual se muestra en la Figura 7b. La humedad del laboratorio ha promediado un 47,8%, mientras que la obra se encuentra en el 60,2%. Esto hace que las probetas de la obra hayan experimentado una retracción menor que las del laboratorio. Además, se puede observar cómo la función de retracción calculada según la normativa EHE subestima notoriamente la retracción medida experimentalmente. Esto no ocurre con la función de fluencia provista por la misma normativa, que aproxima satisfactoriamente las mediciones de las probetas, como se observa en la Figura 8.

Para la determinación de las curvas experimentales de la Figura 8 se ha construido la función de fluencia, $J(t-t_0)$, quitando a las deformaciones medidas en el bastidor de fluencia, $\varepsilon_c(t)$, la retracción promedio medida en las probetas de retracción, $\varepsilon_{cs}(t)$, y dividiendo esta resta por la presión del bastidor ($\sigma_0=10$ MPa).

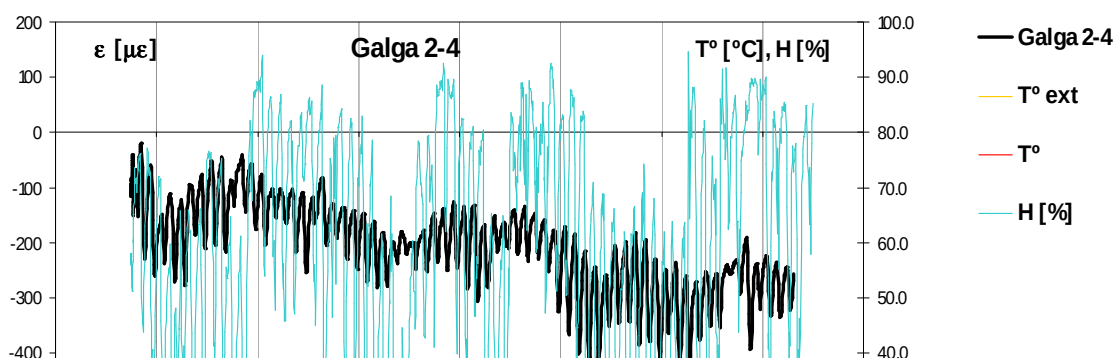


Figura11: Mediciones experimentales de deformación, humedad y temperatura en el tablero, en la sección intermedia del primer vano.

La Figura 9 muestra las deformaciones medidas en la base del pilar instrumentado, en la barra instrumentada nº 5. Se puede observar que el pilar tiene una deformación inicial aproximada de $100\ \mu\epsilon$ y que luego de dos meses experimenta una deformación impuesta del orden de $150\ \mu\epsilon$, con lo cual la deformación final es de $250\ \mu\epsilon$. Esta deformación impuesta es debida a la acción conjunta de fluencia y retracción, aunque la mayor parte de la deformación es producida por la fluencia, que con un coeficiente de fluencia aproximado a 0,9 genera una deformación adicional de $90\ \mu\epsilon$.

La Figura 10 muestra las temperaturas en el interior de la pila, cabeza y base, junto con la temperatura exterior. La temperatura de la base se encuentra notablemente

atenuada respecto a la temperatura ambiente, sin que se manifiesten las variaciones diarias, debido a que el sensor está en la parte enterrada. La cabeza del pilar que está a la intemperie, en cambio, sigue las variaciones de la temperatura ambiente, aunque con una amplitud significativamente menor.

La Figura 11 muestra registros de deformaciones, temperatura y humedad en la sección nº 2 del tablero, en el centro del primer vano, en las dos galgas centrales (2-4 y 2-11). Las galgas experimentan una deformación semejante, siendo levemente superior en la galga inferior, del orden de $-170 \mu\epsilon$ vs. $-145 \mu\epsilon$ de la galga superior, inmediatamente después del tesado del tablero. La Figura 12 muestra la evolución de la curvatura, estimada a partir de las tres galgas centrales superiores (2-3, 2-4 y 2.5) y las tres galgas inferiores (2-10, 2-11 y 2-12). La tendencia que con el tiempo aumenta la curvatura negativa, posiblemente debido a la fluencia como se manifiesta en las comprobaciones teóricas.

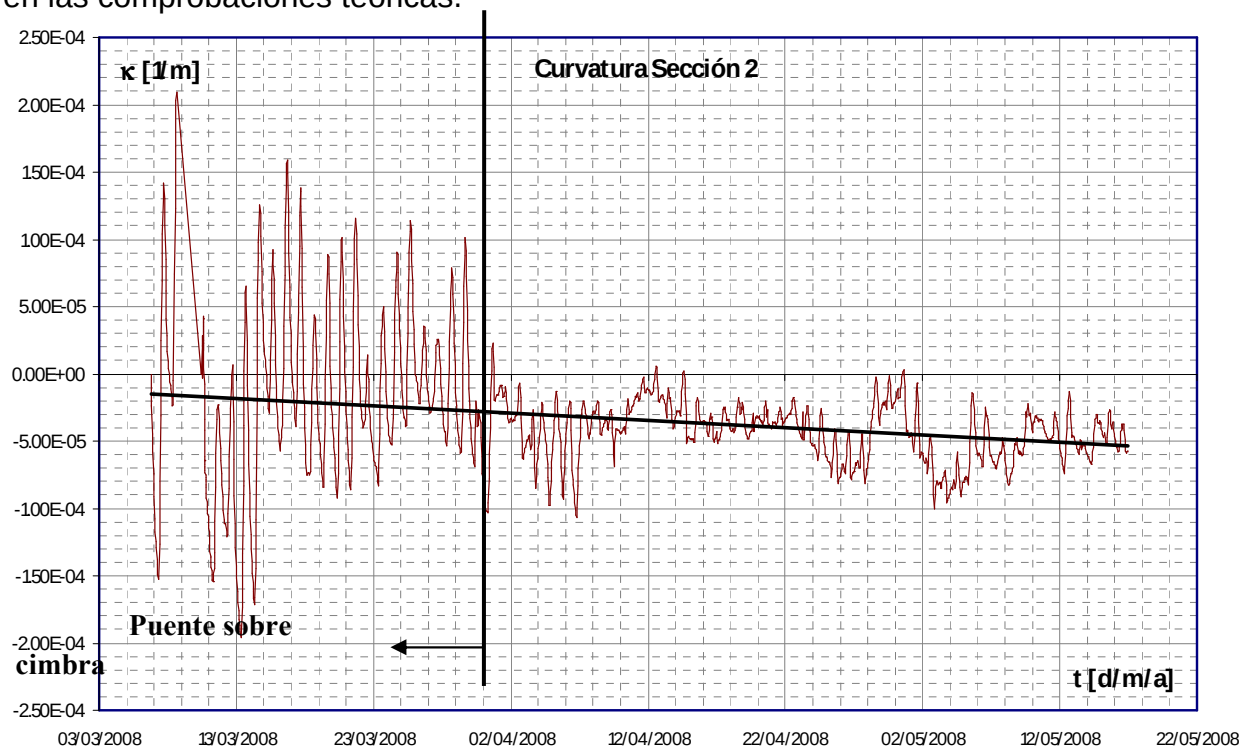


Figura12: Evolución de la curvatura en la sección nº 2 (Centro del primer vano). Se adiciona una línea de tendencia.

Durante las primeras etapas de la toma de datos, se puede observar que la curvatura deducida experimenta fuertes variaciones que luego se atenúan considerablemente. Esto ocurre durante el período en que el tablero se encuentra cimbrado. La parte superior del tablero, expuesta directamente al ambiente, sufre fuertes variaciones, mientras que la parte inferior, en contacto con el encofrado, es mucho más estable. Basta con ver, en la Figura 11, la diferencia entre las oscilaciones de la galga 2-4 y 2-11. Una vez quitada la cimbra, las oscilaciones se equiparan y disminuyen considerablemente.

Comentarios finales y conclusiones parciales de la campaña experimental

En este trabajo se describe la campaña experimental de auscultación de un puente integral de 64 m de longitud, completamente monolítico. Hasta el momento se han medido deformaciones y la temperatura dentro de la masa de hormigón, de una de

las pilas y el tablero. La medición de los movimientos del puente, giros y abertura de juntas, han comenzado parcialmente, aunque no se presentan en este trabajo por contar con pocas mediciones.

La campaña contempla la medición de las condiciones ambientales de la obra, humedad y temperatura, y la caracterización del hormigón utilizado en el puente. Para ello se miden sus propiedades resistentes y su comportamiento reológico.

La auscultación se ha diseñado para medir durante un intervalo prolongado de tiempo y con acceso remoto, para disminuir los traslados a obra.

Los registros experimentales obtenidos hasta el momento permiten concluir que el uso de sensores de cuerda vibrante ha funcionado correctamente durante este lapso de tiempo, trabajando cómodamente dentro de su rango de funcionamiento. De las 70 galgas instaladas en obra, dentro de la masa de hormigón, sólo se ha dañado una de las galgas instaladas durante el hormigonado, perdiendo su capacidad de medición de deformaciones, pero manteniendo su termistor en funcionamiento. Las comparaciones en laboratorio entre las mediciones de deformaciones en la cuerda versus las deformaciones en chinchetas también son satisfactorias. Todo esto demuestra la confiabilidad de este sistema de medición.

La retracción medida en las probetas es mucho mayor que la predicha por la normativa española y la función de fluencia medida experimentalmente se asemeja al valor teórico.

La campaña seguirá durante los próximos años y junto con la campaña experimental predecesora de Barajas ^{1,2 y 3} busca obtener resultados útiles en estructuras reales para la validación de criterios de proyecto de estructuras integrales.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo expresan su agradecimiento a las siguientes personas que se encuentran colaborando para la realización de la campaña experimental. Por parte del Laboratorio de Estructuras de la ETSI de Caminos, al jefe de Laboratorio, Don José Torrico, a los técnicos, Isidro García, Miguel Ángel Peña y Miguel Ángel López y al ingeniero Patricio Padilla. Por parte de FCC, a la gente de I+D+I, a los ingenieros Francisco Capilla y María Isabel Vega. En obra, a los ingenieros Millán Martín de la Torre-Velver, Fernando Sotos, Miguel Ángel Blanco y todo el equipo de Las Berlanas. Todos han colaborado en la realización de esta tarea y gracias a su apoyo y experiencia la campaña experimental se está desarrollando satisfactoriamente.

Referencias

¹ H. CORRES, J. MARTÍN-CARO, T. P. PETSCHKE, V. MORENO y J. TORRICO, "Estudio Analítico y Experimental de las Deformaciones Impuestas en las Estructuras Integrales", Hormigón y Acero de ACHE, 2004.

² H. CORRES, T. P. PETSCHKE, J. I. EZEBERRY, "Instrumentación y Auscultación de Estructuras Reales", III Congreso de ACHE de Puentes y Estructuras, Zaragoza, 2005.

³ "Estudio analítico y experimental de los efectos de las deformaciones impuestas en las estructuras integrales". Concedido dentro del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2000-2003.

⁴ Proyecto PROFIT "I+D sobre Puentes Integrales sin Juntas (Puentes Integrales)". Plan Nacional de I+D+I (2004-2007) en la parte dedicada al fomento de la investigación técnica.

⁵ Slope Indicator. <http://www.slopeindicator.com>.

⁶ Código Modelo, MC-90.

⁷ Instrucción Española de Hormigón Estructural, EHE.